Aus der Medizinischen Universitäts-Poliklinik Würzburg
Direktor: Professor Dr. med. H. Franke
und der Neurologischen Universitätsklinik Würzburg
Direktor: Professor Dr. med. G. Schaltenbrand

# DIE BEDEUTUNG DES ZENTRALEN BEWEGUNGSENTWURFES FÜR DIE RASCHE WILLKÜRKONTRAKTION

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

verfaßt und der

hohen Medizinischen Fakultät

der

Julius - Maximilians - Universität Würzburg

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Jürgen Hausmanns

aus Dülken

Würzburg 1966

1967

Aus der Medizinischen Universitäts-Poliklinik Würzburg
Direktor: Professor Dr. med. H. Franke
und der Neurologischen Universitätsklinik Würzburg
Direktor: Professor Dr. med. G. Schaltenbrand

---

# DIE BEDEUTUNG DES ZENTRALEN BEWEGUNGSENTWURFES FÜR DIE RASCHE WILLKÜRKONTRAKTION

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

verfaßt und der

hohen Medizinischen Fakultät

der

Julius - Maximilians - Universität Würzburg

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Jürgen Hausmanns

aus Dülken

Würzburg 1966

Referent: Priv. Doz. Dr. med. H.C. Hopf

Korreferent: Prof. Dr. med. G. Schaltenbrand

Tag der Promotion: 22.2.67

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität Würzburg

INHALTSVERZEICHNIS


| | Seite |
|---|---|
| EINLEITUNG | 1 |
| FRAGESTELLUNG | 3 |
| Methodik | 4 |
| Ergebnisse | 11 |
| A. Die Kontraktion bei gleichen Ausgangsbedingungen | 11 |
| B. Die Muskelaktivität bei wechselnden Ausgangsbedingungen | 15 |
| DISKUSSION | 26 |
| ZUSAMMENFASSUNG | 33 |
| TABELLEN | 34 |
| LITERATURVERZEICHNIS | 42 |

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

# EINLEITUNG

Schon frühzeitig war bekannt, daß die Möglichkeit zur Bewegung in einem irgendwie gearteten Zusammenhang mit der Funktion des Gehirns steht; daß sie im großen und ganzen dem Willen unterworfen ist, war offensichtlich. Der Weg bis zur Kenntnis der vielfältigen Einflußmöglichkeiten auf die Variabilität der Motorik, wie wir sie heute besitzen, war indessen noch weit.

Die ersten Vorstellungen über das Nervenprinzip, welches die Willensimpulse bis zur Bewegung vermittelt, bezogen sich auf das Pneuma und den Spiritus animalis (ARISTOTELES, GALEN, VESAL). Sie wurden später durch das Postulat eines flüssigen Stoffs, des Nervensaftes, abgelöst (MALPIGHI, BORELLI, VIEUSSENS und Johann Gottfried von BERGER). An ein immaterielles Prinzip dachte Georg Ernst STAHL; er näherte sich damit der Elektrizitätstheorie. Erst durch die Versuche von GALVANI, MATTEUCCI und Emile du BOIS-RAYMOND wurde die Bedeutung elektrischer Vorgänge als Vermittler der Erregung in den Nerven erkannt.

Albrecht von HALLER unterschied bereits 1747 zwischen der Erregbarkeit des Nerven und der des Muskels. Der Nachweis, daß Empfindungs- und Bewegungsnerven an verschiedenen Stellen Anschluß an das Rückenmark finden, gelang BELL, MAGENDIE und Johannes MÜLLER. BELL vermutete bereits einen sensiblen Apparat der Muskulatur selbst. Eine in diesem Zusammenhang wichtige Entdeckung gelang RUFINI 1892, der die Muskelspindeln und Sehnenkörperchen als sensible Organe des Muskels

identifizierte. Reflektorische Tätigkeiten des Nervensystems hatten WILLIS und BAGLIVI schon gedanklich konzipiert. HUNTER beobachtete die ersten Fremdreflexe, die H. MAYO nach ihm genauer beschrieb.

GLISSON differenzierte willentliche Bewegungen von solchen bei dekapitierten Tieren. WITT zeigte, daß für die letzteren, die unwillkürlichen Bewegungen, das Rückenmark wesentlich war. Ins Bewußtsein dringen diese "Reflektionen" erst - so sah es UNZER - wenn sie über das Gehirn gelangen. Der Nachweis, daß reflektorische Phänomene auch auf spinaler Ebene durch den Willen (von zentral her) beeinflußt werden können, gelang HALL. Er wies auch bereits 1837 darauf hin, daß der zentrale Impuls (Wille) nicht darauf gerichtet ist, einzelne Muskeln zu aktivieren, sondern daß er komplexer ausgerichtet, ein Ziel, ein Objekt, also auf übergeordneter Ebene einen ganzen Handlungsablauf anstrebt. Diese Vorstellung wurde durch die Ergebnisse cortikaler Reizversuche in vieler Hinsicht bestätigt (ADRIAN and MORUZZI[1]; GELLHORN, E.[8]).
Seit SHERRINGTON jedoch wurde das Augenmerk immer stärker auf die peripheren regulierenden Momente gerichtet (myotatische Reflexe). P. HOFFMANN glaubte sogar, der Eigenreflex besitze eine eminente Bedeutung für den Ablauf der Bewegung. Als schließlich das Gamma-System und seine Wirkungsweise durch LEKSELL (1945), KUFFLER (1951) und GRANIT (1952) entdeckt wurde, und die Bedeutung der autogenen Hemmung erkannt war (GRANIT 1950), wurde die Motorik vorwiegend, ja fast ausschließlich unter dem Aspekt der proprioceptiven Systeme betrachtet. Auf den ersten Blick mag es daher heute so scheinen, als ob die zentralen Impulse gegenüber dem peripheren Regelkreis eine untergeordnete Rolle spielen.

## FRAGESTELLUNG

WACHOLDER versuchte als einer der ersten mittels elektromyographischer Technik, Unterschiede zwischen einer willkürlichen und einer unwillkürlichen Bewegung (wir würden vielleicht besser von einer reflektorischen sprechen) herauszuarbeiten. Da das morphologische Substrat gleich bleibt, konnte die Verschiedenheit nur auf funktioneller Ebene gesucht werden. WACHOLDER stellte dazu fest: "Das wesentliche Kennzeichen einer Willkürbewegung ist, daß sie bewußt oder unbewußt, absichtsgemäß ausgeführt wird". Dazu erwähnt er zwei wichtige Vorbedingungen: einmal erhält jeder einzelne der beteiligten Muskeln Mitteilung vom zentralen Nervensystem über Beginn und Art seiner Aktion; zum zweiten müßte die Einzelaktion jedes an einer Bewegung beteiligten Muskels sinnvoll mit den anderen koordiniert sein. Im Hinblick auf die Koordination dürfen wir uns der Definition von WEISS anschließen, der sie als "selektive Aktivierung der Muskeleinheiten in einer solchen Kombination, daß eine vereinte Aktivität einen sinnvollen, organisierten äußerlichen Effekt ergibt", definierte (siehe dazu auch ECCLES und LUNDBERG 1959, GRANIT 1955, SHERRINGTON 1960).

Wie äußert sich nun der Wille, d.h. die bewußte geistige Entscheidung bei einer gewollten Muskelaktion? Der augenscheinlichste Einfluß ist der absichtsgemäße Beginn und die gewollte Beendigung der Bewegung. Der Ablauf, d.h. ob sie schnell oder langsam, gleichmäßig oder ungleichmäßig, ungehemmt oder gebremst usw. ausgeführt wird, muß dem Willen unterworfen sein. Der Zweck dieser Aktion liegt darin, eine bestimmte Aufgabe zu lösen. Dabei können wir immer wieder beobachten, daß sich der Körper in Vorwegnahme des tatsäch-

lichen Geschehens auf die zu erwartende Leistung einstellt. Dies mag durch ein Beispiel aus dem Alltag erläutert werden: Wollen wir einen Koffer vom Boden hochheben, so versuchen wir, eine Vorstellung von dem erforderlichen Kraftaufwand zu bekommen. Dies gelingt besser, je genauer wir das Gewicht des Koffers kennen. Daher erfolgt gewöhnlich zunächst ein probeweises Anheben. Je präziser nun unsere Schätzung aufgrund dieses Vorversuches mit der Wirklichkeit des Gewichtes übereinstimmt, um so ökonomischer und ungestörter ist der Bewegungsablauf. Haben wir uns verschätzt, so sind wir gezwungen uns umzustellen. Welcher Zeitraum wird aber für diese Umstellung benötigt? Ist es möglich, diese Korrektur noch während des Bewegungsablaufs vorzunehmen und in welchem Umfang ist dies möglich? Oder muß der gesamte Bewegungsablauf neu begonnen werden? Andererseits: wie leicht läßt man sich täuschen, sei es durch Fremd- oder Selbstbeeinflussung?

Aufgrund dieser Überlegungen ergab sich für die vorliegende Arbeit die folgende Fragestellung: wie verhält sich die Vorspannung eines Muskels bei einer definierten Leistung? Durch welche zeitlichen Gegebenheiten ist der Bewegungsablauf gekennzeichnet? Richtet sich die Einstellung eines Muskels nach der imaginativen Fähigkeit der Versuchsperson, oder ist bei verschiedenen Aufgaben keine Differenzierung zu erkennen? Ist eine Korrektur des Aktivitätseinsatzes möglich, wann und unter welchen Bedingungen?

## Methodik

Die Untersuchungen wurden an 12 neurologisch unauffälligen männlichen und weiblichen Versuchspersonen im Alter zwischen 22 und 30 Jahren durchgeführt. Als aktiver Muskel wurde der M. biceps brachii gewählt. Dieser Muskel schien aufgrund

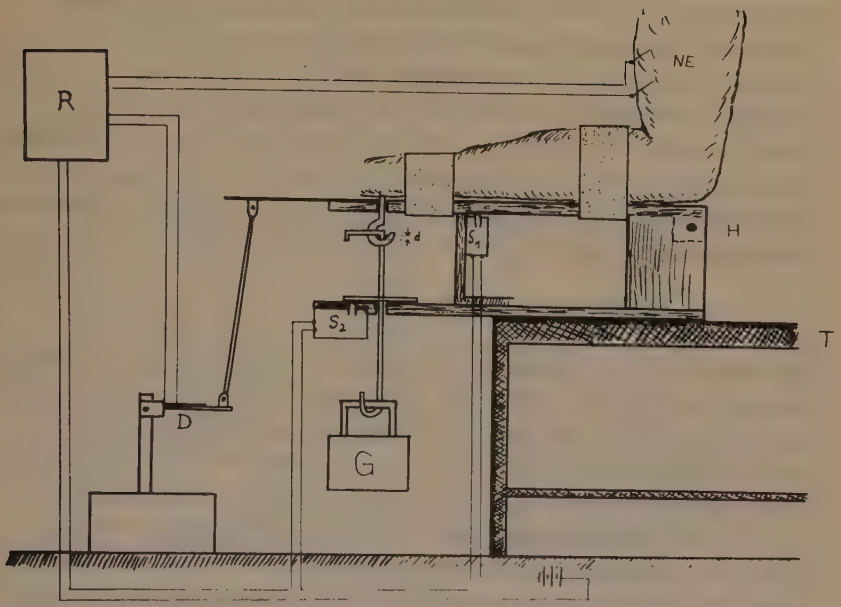


Abb. 1 Skizze der Versuchsordnung
(Erläuterung siehe Text)

mehrerer Gesichtspunkte für die vorliegenden Experimente gut geeignet: er ist kräftig, greift an einem Scharniergelenk an. Er liegt ziemlich isoliert, so daß eine Überlagerung durch Aktionspotentiale von Synergisten oder Antagonisten nicht zu befürchten ist.
Als Gewichte dienten 0,5 kg, 1 kg, 2 kg, 4 kg und 8 kg. Diese Gewichte sollten von den Probanden in zwei aufeinanderfolgenden Versuchsreihen auf ein Zeichen hin mit möglichst gleich rascher Geschwindigkeit jeweils bis zu einer bestimmten Höhe angehoben werden.

Abb. 1

Die für die Untersuchungen verwendete Apparatur ist nebenstehend abgebildet (Abb. 1). Der Hebel (H) mit seiner festgestellten Achse ist auf einem Tisch (T) befestigt. Am oberen beweglichen Teil wird der Unterarm des Probanden durch zwei breite Riemen in Supination bei gleichzeitiger Flexion des Ellbogengelenkes von 90 Grad fixiert. Die Pronationsmöglichkeit wurde ausgeschaltet. Es wurde darauf geachtet, daß die Achse des Ellbogengelenkes und des Hebelgelenkes nahezu übereinstimmten. Die einzelnen Gewichte (G) wurden am freien Ende des Hebelarmes aufgehängt. Zur Registrierung der Zeitmarken dienten zwei Präzisionsschalter (S 1 und S 2) mit einer Auslösedifferenz (d) von 0,5 mm, entsprechend einem Ausschlag des vorderen Hebelendes von etwa 1 mm. Der erste Schalter löst einen Impuls in dem Moment aus (S 1), da der zunächst unbelastete Hebelarm ein wenig gehoben wurde, so daß er nunmehr Kontakt zum Gewicht hatte. Der Impuls über den zweiten Schalter (S 2) entsprach dem Zeitpunkt, zu dem das Gewicht hochgehoben wurde, d.h. zu dem das Gewicht nun unvermindert auf den M. biceps brachii einwirkte und die isotonische Kontraktion begann. Die mechanischen Kräfte wurden von einem Dehnungsmessstreifen (D) aufgenommen und über eine Brückenschaltung auf einen

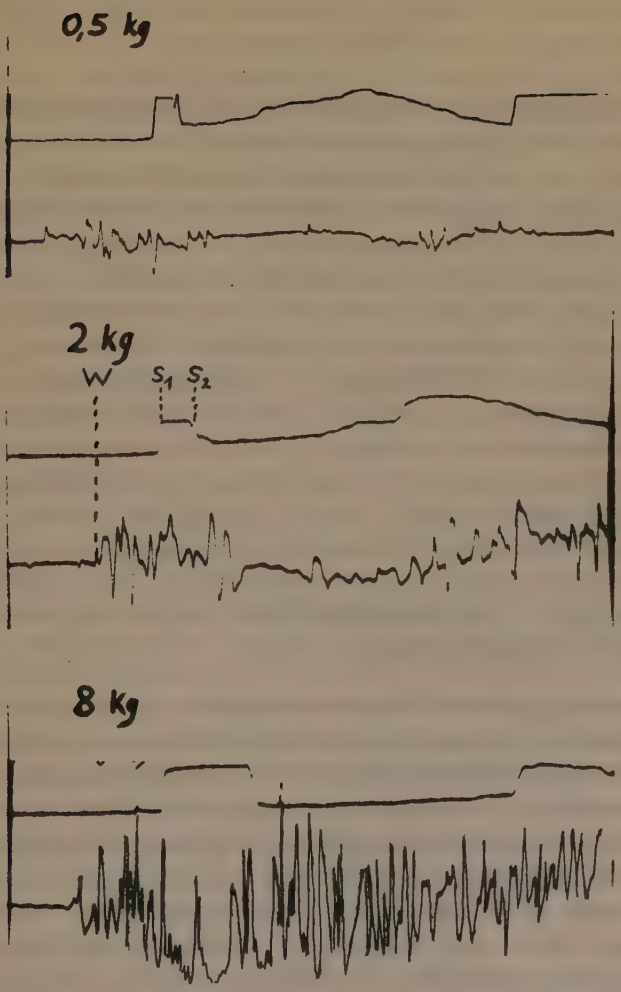


Abb. A Aufzeichnungsbeispiele bei verschieden schweren Gewichten mit Markierung der Intervalle W - S 1 und S 1 - S 2

Direktschreiber (R) übertragen. Bei diesem Direktschreiber handelte es sich um ein umgebautes Schwarzer-EKG-Gerät.

Abb. A

Als Ableiteelektroden für die elektrische Muskelaktivität benutzten wir zwei blanke Stahlnadeln (NE) von 0,2 mm Durchmesser. Sie wurden unter Beachtung der üblichen Kautelen in etwa 4 cm Abstand senkrecht zur Faserrichtung in den M. biceps brachii eingestochen, so daß eine bipolare Anordnung erreicht wurde. Nach Angaben von SNYDER[25] verändert sich die Größe der elektrischen Aktionspotentiale bei einem Elektrodenabstand, der größer als 2,5 cm ist, nicht mehr, da eine Überlappung der elektrischen Felder der Einzelelektroden unterbleibt. Bei gelegentlichen Klagen über Schmerzsensationen wurden die Elektroden versetzt, bis sie schmerzfrei toleriert wurden. Nach den Untersuchungen von CLOSE und Mitarbeitern[5] spielt die Richtung der Elektroden in Beziehung zur Muskelfaserrichtung keine Rolle. Die elektrischen Impulse wurden ebenfalls auf das Schwarzer-Gerät übertragen. Elektromyographische und mechanische Abläufe wurden synchron aufgezeichnet.

Die für die vorliegende Fragestellung maßgeblichen Vorgänge spielen sich ab zwischen dem Zeitpunkt, an dem der Muskel durch den Willkürimpuls aktiviert wird (W) und dem Moment, an dem die entwickelte Spannung die ihr entgegenwirkende Kraft des Gewichtes gerade überwindet (Markierung durch den Schalterimpuls S 2, an dem also die Bewegung einsetzt). Dieser Abschnitt erfährt eine wesentliche Unterteilung durch den Schaltimpuls S 1: vorher hat der Muskel keinen Kontakt zum Gewicht, er vermag also keine Information über das tatsächliche Gewicht an das Zentrum zu liefern; dies wird vielmehr frühestens in dem Abschnitt S 1 - S 2 möglich. In der gesamten Zeit zwischen W und S 2 kontrahiert

sich der Muskel isometrisch, da Ansatz und Ursprung praktisch fixiert bleiben.

In einer ersten Serie wurde untersucht, ob überhaupt eine Beeinflussung des Erregungsablaufes im M. biceps brachii durch die Willkür nachweisbar ist, und wenn ja, wie sich diese Beeinflussung äußert. Dazu ließen wir jedes Gewicht mehrmals anheben. Zunächst hatte der Proband keinen Anhaltspunkt für die Größe der geforderten Leistung, das Gewicht blieb u n g e n a n n t , so daß er im Ungewissen gelassen wurde. Gleich nach Absetzen des Gewichtes mußte es noch einmal angehoben werden. Der Proband hatte bei dieser W i e d e r h o l u n g eine recht genaue Vorstellung über das tatsächliche Gewicht. Vor dem dritten Anheben wurde das Gewicht lediglich g e n a n n t , wobei wir erfahren wollten, wieweit rein vorstellungsmäßig eine genaue Einstellung erreicht werden kann. Um den Eindruck aus dem ersten und zweiten Versuch zu verwischen, wurde der dritte erst nach mehreren Hebeversuchen mit anderen Gewichten durchgeführt.

Von der zweiten Serie erwarteten wir Aufschluß über den Anteil der zentralen bzw. reflektorischen Regelung im Gesamtablauf der Willkürkontraktion. Dabei wurden in wechselnder Reihenfolge richtig und absichtlich falsch benannte Gewichte angeboten. Entspräche das Ergebnis bei Nennung des falschen Gewichtes dem des tatsächlich angehängten , so könnte die willkürliche Einflußnahme nur eine untergeordnete Rolle spielen; im anderen Fall käme der willkürlichen Einstellung die entscheidende Bedeutung zu.

Vor dem eigentlichen Versuch hatten die Versuchspersonen Gelegenheit, sich mit den einzelnen Gewichten vertraut zu machen. Nach durchschnittlich fünf Probezügen waren sie überzeugt, bei jedem Gewicht die richtige Einstellung treffen zu können. Nachdem der Proband die Muskeln vollkommen entspannte - sichtbar an dem Sistieren der Aktivität im Elektromyogramm -, wurde mit der eigentlichen Versuchsreihe begonnen. Die Gewichte wurden in einer bestimmten Reihenfolge angeboten, die willkürlich festgelegt war, wobei jedoch darauf geachtet wurde, daß die drei Grundversuche ungenannt, Wiederholung, genannt, getrennt voneinander durchgeführt wurden.

Serie I

| | | |
|---|---|---|
| Belastet wurde mit: | 1. | 0,5 kg ungenannt |
| | 2. | 0,5 kg Wiederholung |
| | 3. | 1,0 kg genannt |
| | 4. | 4,0 kg genannt |
| | 5. | 8,0 kg genannt |
| | 6. | 1,0 kg ungenannt |
| | 7. | 1,0 kg Wiederholung |
| | 8. | 8,0 kg ungenannt |
| | 9. | 8,0 kg Wiederholung |
| | 10. | 2,0 kg ungenannt |
| | 11. | 2,0 kg Wiederholung |
| | 12. | 0,5 kg genannt |
| | 13. | 2,0 kg genannt |
| | 14. | 4,0 kg ungenannt |
| | 15. | 4,0 kg Wiederholung. |

Serie II (Täuschungsversuch)

| | | |
|---|---|---|
| Belastet wurde mit: | 1. | 0,5 kg, genannt 8,0 kg |
| | 2. | 4,0 kg, genannt 4,0 kg |
| | 3. | 8,0 kg, genannt 0,5 kg |
| | 4. | 0,5 kg, genannt 4,0 kg |
| | 5. | 4,0 kg, genannt 0,5 kg |
| | 6. | 0,5 kg, genannt 0,5 kg |
| | 7. | 8,0 kg, genannt 8,0 kg |

Zwischen den Einzelversuchen wurden Pausen eingelegt, lange genug, daß der Muskel wieder völlig entspannt werden konnte. Bei gelegentlichen Ermüdungserscheinungen wurden die Pausen ausgedehnt.

Ausgemessen wurde

a) die Zeitspanne zwischen dem Beginn der elektrischen Erregung und der Kontaktnahme mit dem Gewicht (W-S1);
b) das Ausmaß der vorlaufenden Aktivität im Muskel;
c) die Dauer der isometrischen Kontraktion (S1 - S2).

Aus diesen Werten ergibt sich, ob das Ausmaß der Vorspannung, die Dauer der Vorspannung oder die Dauer der isometrischen Kontraktion in Beziehung zu den einzelnen Gewichten, d.h. also in Beziehung zu der beabsichtigten Leistung steht.

## Ergebnisse

### A. Die Kontraktion bei gleichen Ausgangsbedingungen (Wiederholtes Anheben eines Gewichtes)

1. Der Abschnitt W - S 1 (Vorspannung - Beginn der Kontaktnahme mit dem Gewicht)

a) Zunächst bestimmten wir die Zeit zwischen dem Beginn der Erregung und der ersten Kontaktnahme mit dem Gewicht. Letztere wurde angezeigt durch den Impuls S 1. Die Auswertung ergab im Mittelwert eine nahezu konstante Dauer von 250 msec bei verschiedenen schweren Gewichten. Die maximale Abweichung beträgt + 205 und - 150 msec. Die mittlere Abweichung vom Mittelwert errechnet sich auf $\pm$ 62 msec. Dabei sind die Vorspannungszeiten bei den einzelnen Versuchspersonen während aller Versuche fast konstant; größere Differenzen ergeben sich nur beim Vergleich der Versuchspersonen untereinander (Abb. 2 und Tab. I).

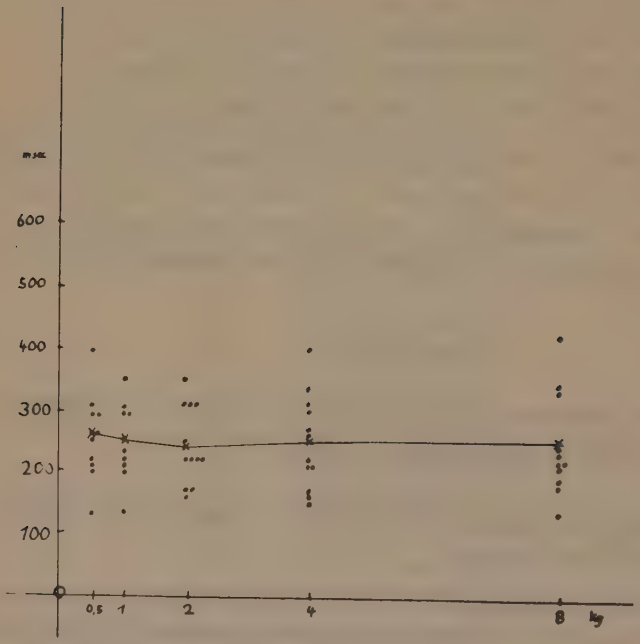


Abb. 2 Mittlere Dauer des Zeitabschnittes W-S1 in msec.

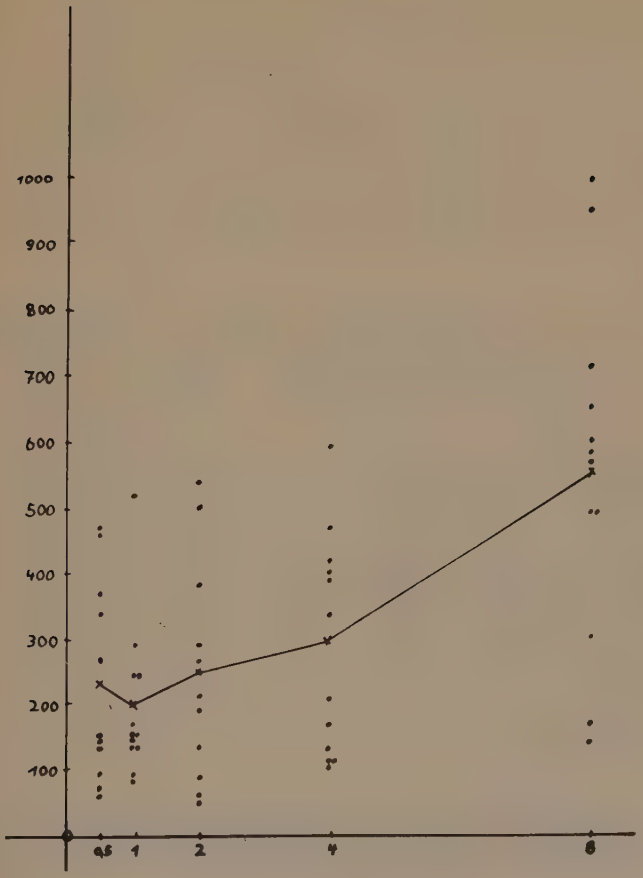


Abb. 3 Aktivität $\bar{A}$ x $\bar{F}$ während des Zeitabschnittes W - S 1

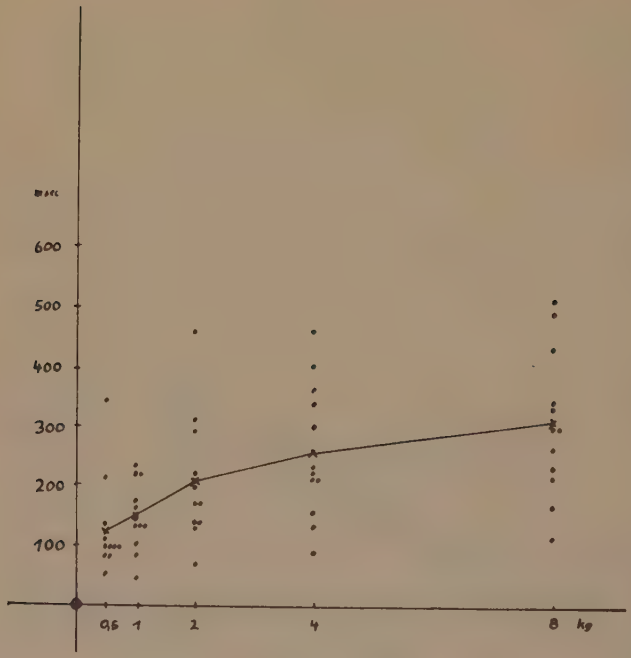


Abb. 4 Zeitdauer der isometrischen Kontraktion (S1-S2) in msec.

b) Als nächstes untersuchten wir das Ausmaß der elektrischen Aktivität während des Abschnittes W - S 1. Dazu hielten wir uns an die von BAYER und FLECHTENMACHER empfohlene Art der Auswertung: Diese Autoren fanden in dem Produkt aus mittlerer Amplitude ($\bar{A}$) und mittlerer Frequenz ($\bar{f}$) einen Ausdruck für die isometrische Spannung, deren Größe dem anzuhebenden Gewicht entspricht. Es ergibt sich, daß dieser Zusammenhang auch für die Zeit der Voreinstellung (Vorspannung) gültig ist: das Produkt aus A x f steht in linearer Beziehung zum Gewicht (Abb. 3 und Tab. II, a - d).

2. Die Zeit der isometrischen Kontraktion (S 1 - S 2), d.h. der Abschnitt zwischen Beginn der Kontaktnahme mit dem Gewicht und dem Beginn der Bewegung.

In dieser Phase ist zu beobachten, daß die Zeit zwischen beiden Schaltimpulsen (S 1 und S 2) mit steigendem Gewicht sichtbar, doch relativ gering zunimmt. Die Dauer der isometrischen Kontraktion steht also in einem bestimmten Verhältnis zu dem entsprechenden Gewicht, welches möglicherweise eine logarithmische Beziehung darstellt (Abb. 4 und Tab. III).

## B. Die Muskelaktivität bei wechselnden Ausgangsbedingungen

Wie in der Methodik ausgeführt hatten die Probanden die einzelnen Gewichte zuerst unbenannt, anschließend als Wiederholung und nach einer Pause bei Nennung des wahren Gewichtes anzuheben. Dabei zeigte sich folgendes:

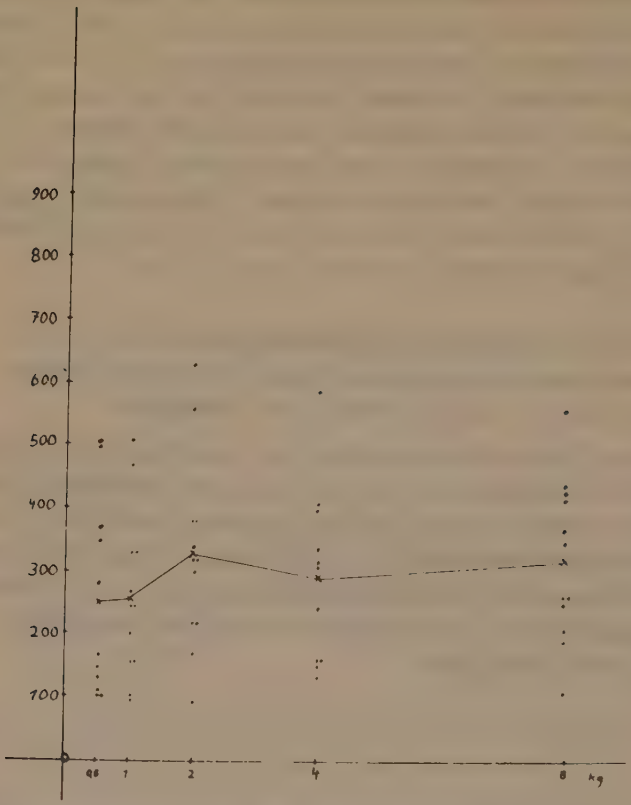


Abb. 5 (a-c) zeigt das Verhalten von $\bar{A}$ x $\bar{F}$ während der Zeit W - S 1

a) Das vorhandene Gewicht ist nicht näher benannt worden (Gewicht ungenannt)

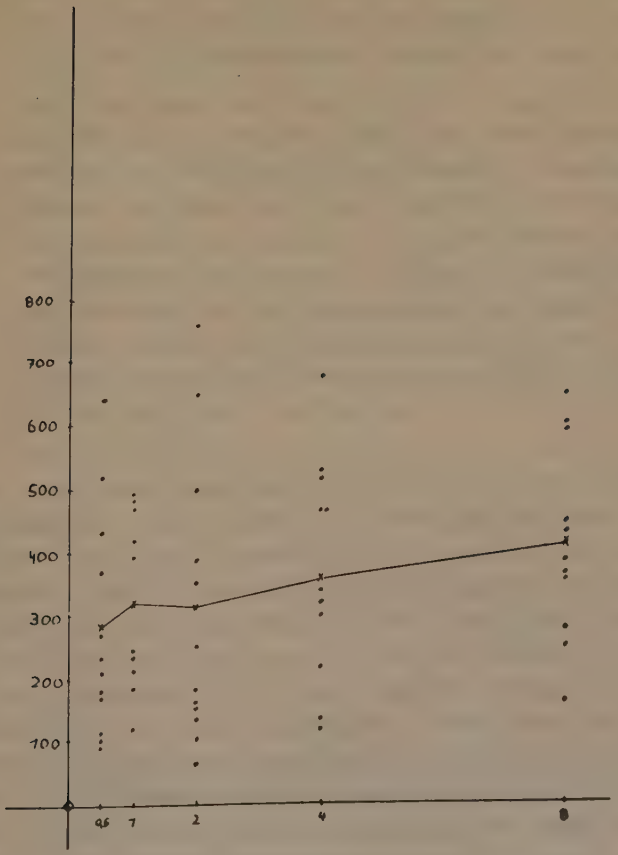


Abb. 5 b) Das Gewicht ist vor dem Anheben genau bezeichnet worden (Gewicht genannt)

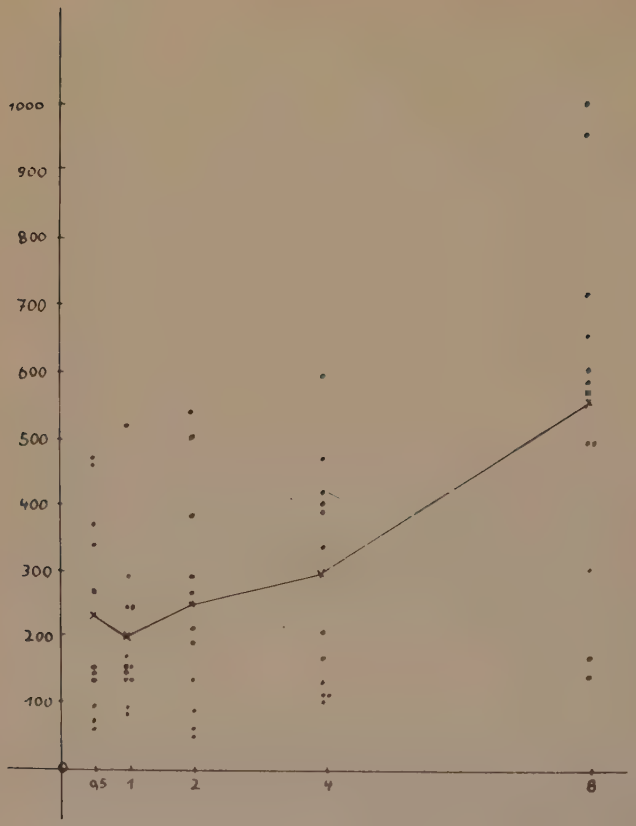


Abb. 5 c) Nach dem Anheben des unbenannten Gewichtes wird dieses erneut angehoben (Gewicht Wiederholung)

1. Die Phase W - S 1

a) Die Zeit des Intervalls bleibt auch bei wechselnden Versuchsbedingungen unter Berücksichtigung der oben erwähnten Einschränkungen konstant um etwa 250 msec.

b) Die Genauigkeit der Voreinstellung, gemessen an dem Produkt A x f, variiert deutlich: wird die Versuchsperson über das tatsächliche Gewicht im unklaren gelassen, so liegen alle Werte um 300. Wird das Gewicht aber genannt, so ist ein Anstieg der Werte entsprechend den Gewichten zu erkennen. Dieser Anstieg kommt am deutlichsten bei der Wiederholung des Versuches heraus. Dabei sinken die Ausgangswerte für das kleinste Gewicht bis auf 200, die maximalen Werte steigen auf über 500 an (Abb. 5 a, b, c).

Diese Ergebnisse erhalten Bestätigung durch die Versuche der Serie II. Dabei wurden den Probanden in einer variierenden Reihenfolge die Gewichte richtig und absichtlich falsch angegeben. Auffälligerweise folgt hierbei A x f nicht den tatsächlichen, sondern den genannten Gewichten, also denen, auf die sich die Versuchsperson einstellen soll und offensichtlich auch eingestellt hat (Abb. 6). Dies besagt, daß in einer Situation, in der die Versuchsperson über die von ihr geforderte Aufgabe im unklaren ist, eine mittlere Einstellung entsprechend einem mittelschwerem Gewicht gewählt wird. Gibt man der Versuchsperson indessen einen Anhaltspunkt (verbal) über die zu erwartende Aufgabe, so wird die initiale Muskelspannung ziemlich genau diesen Gegebenheiten angepasst.

2. Die Phase S 1 - S 2, die Zeit der isometrischen Kontraktion.

Für den Idealfall der ausschließlich zentralen Programmierung könnte man geneigt sein zu unterstellen, daß - eine exakte

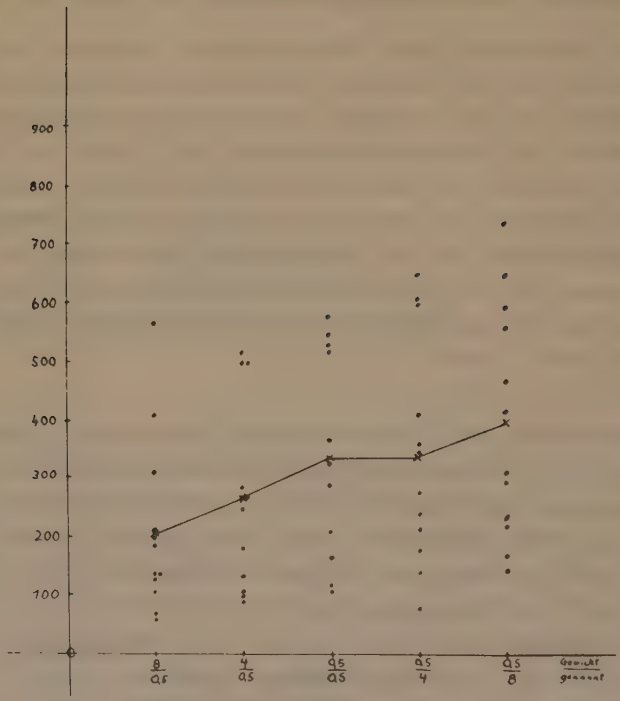


Abb. 6 Aktivität $\bar{A}$ x $\bar{F}$: die vorhandenen Gewichte entsprechen nicht immer den genannten (Täuschungsversuch Serie II)

Voreinstellung vorausgesetzt - die Zeit, die zur Anhebung jedes beliebigen Gewichtes notwendig ist, weitgehend gleich bleibt, jedenfalls solange die Grenzen der Belastbarkeit des Muskels eingehalten werden. Wie physikalische Überlegungen zeigen, widerspricht dies aber einer ökonomischen Arbeitsweise des Muskels. Setzt man eine konstante Dauer der isometrischen Kontraktion voraus und berechnet danach den erforderlichen Kraftaufwand, so ergibt sich eine erheblich steil geneigte Kurve für den Kraftanstieg im Hinblick auf die jeweils größere Leistung. Dadurch wäre für die größeren Gewichte von 4 und 8 kg ein unverhältnismäßig großer Kraftaufwand notwendig. Soll der Muskel also ökonomisch eingesetzt werden, so ist von vornherein auch bei einer rein zentralen Programmierung eine zunehmende Verlängerung der Dauer der isometrischen Kontraktion bei steigenden Gewichten anzunehmen (Abb. 7)

Abbildung 8 zeigt, daß das Intervall S 1 - S 2 je nach Voreinstellung verschieden stark, aber analog den Gewichten zunimmt. Bei nichtgenanntem Gewicht wird eine deutliche Dehnung des Abschnittes entsprechend der Belastung festgestellt. Werden die Gewichtsgrößen vorher bekannt gegeben, so nimmt das Intervall S 1 - S 2 zwar noch deutlich zu, man erkennt jedoch eine Tendenz zur Angleichung der isometrischen Kontraktionsdauer. Bei wiederholtem Anheben ist nur mehr eine geringe Verlängerung dieses Zeitabschnittes festzustellen, was auch eine optimale Auslastung des Muskels garantiert.

Man muß daraus schließen, daß die Einstellung der Versuchspersonen zunächst noch nicht exakt ist. Die Unsicherheit wirkt sich offenbar dahingehend aus, daß von vornherein ein variierend angelegter Bewegungsablauf in Gang gesetzt wird, ähnlich den Probeversuchen, denen wir im täglichen Leben begegnen (s.Einleitung).

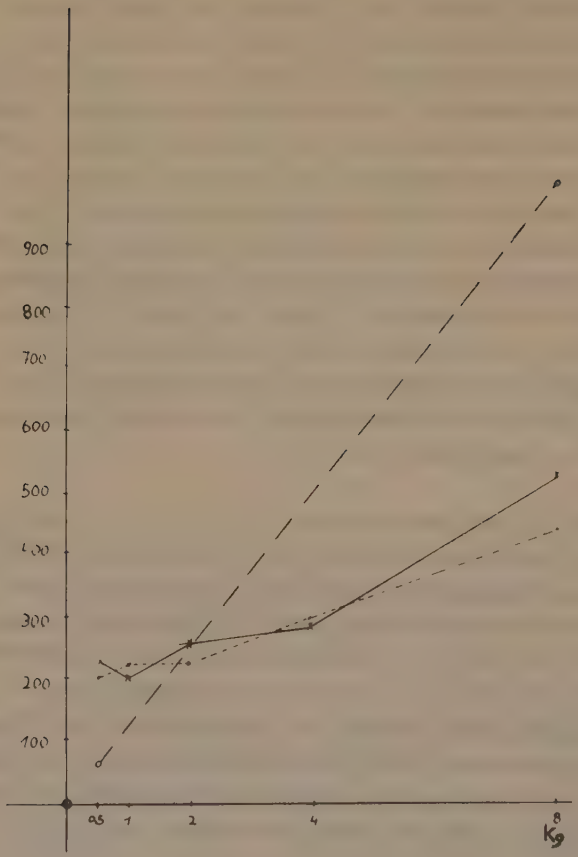


Abb. 7 Verhalten der physikalisch errechneten kinetischen Energie bei konstanter mittlerer Zeit (0,2 sec) von S 1 - S 2 (-----) und bei der tatsächlichen benötigten Zeit (.....) für S 1 - S 2 im Vergleich zu $\bar{A} \times \bar{F}$ bei wiederholtem Anheben des Gewichtes (_____)

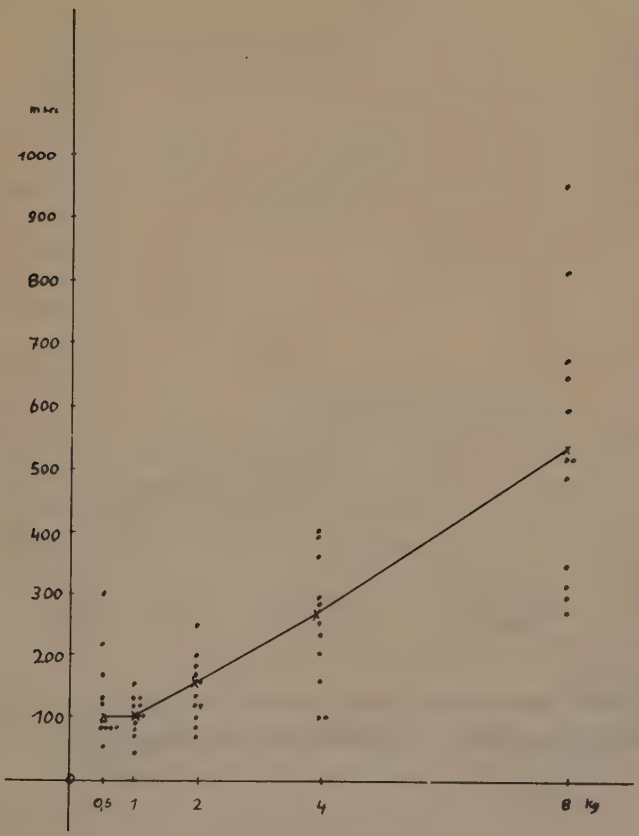


Abb. 8 (a-c) zeigt das Verhalten der Zeitdauer S 1 - S 2 bei wechselnden Ausgangsbedingungen:

a) Das vorhandene Gewicht ist nicht näher benannt worden (Gewicht ungenannt)

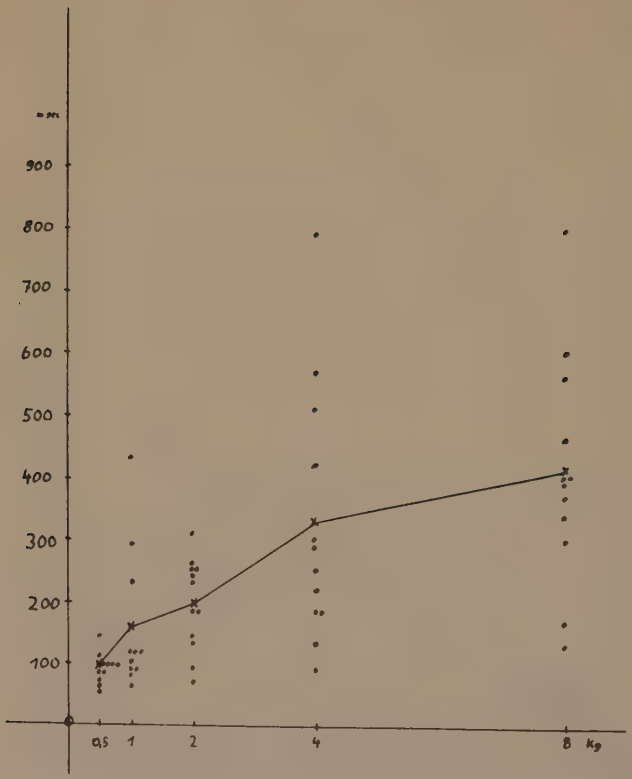


Abb. 8 b) Das Gewicht ist vor dem Anheben genau bezeichnet worden (Gewicht genannt)

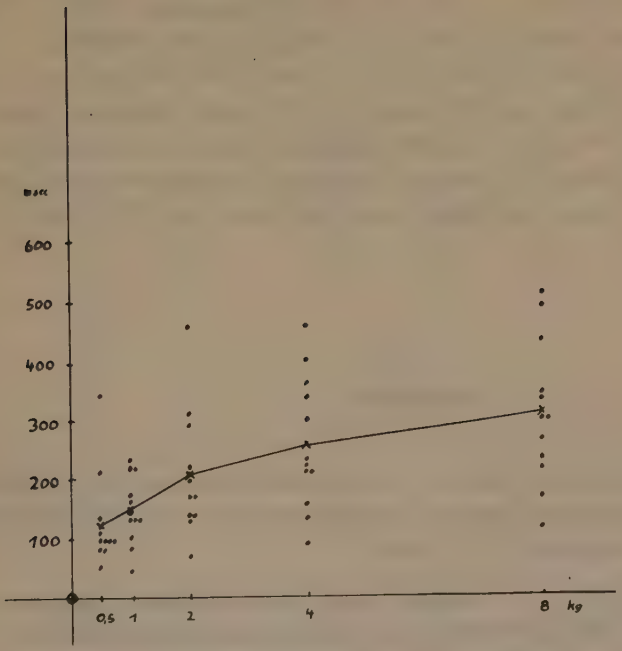


Abb. 8 c) Nach dem Anheben des unbenannten Gewichtes wird dieses erneut angehoben (Gewicht-Wiederholung)

Abbildung 9 und 10 geben das Bild einer zentralen Fehlsteuerung wieder. Das tatsächliche Gewicht ist größer als das genannte. Es ergibt sich für S 1 - S 2 ein unendlich großer Wert. Liegt das tatsächliche Gewicht deutlich unter dem geschätzten, so nimmt S 1 - S 2 im Vergleich zu den "normalen" Werten ab. Der Bewegungseffekt ist in diesen Fällen grob überschießend, unökonomisch; er ähnelt einem hypermetrischen Bewegungsablauf. Beachtenswert erscheint, daß eine Korrektur nicht vorgenommen wird, und zwar über einen Zeitraum von 1500 msec.

## DISKUSSION

Unsere Untersuchungen lassen sich in zwei Abschnitte gliedern, nämlich einerseits in den der Vorspannung W - S 1 und andererseits in das Intervall S 1 - S 2.

In dem Abschnitt W - S 1 werden alle jene Erscheinungen erfaßt, die vor dem Sichtbarwerden mechanischer Aktivität des M. biceps brachii auftreten. Sie sind elektrischer Natur und lassen sich nur durch das Elektromyogramm aufzeichnen und auswerten. Die elektrischen Impulse im Muskel setzen etwa 250 msec vor Beginn der mechanischen Registrierung ein (Abb. 2). Dieses Phänomen wurde auch von anderen Autoren beschrieben (siehe CLOSE u.a.[5], HERTERICH[9], HUFSCHMIDT[16], WACHOLDER[26]. Zu einem Teil wird dieser Vorlauf auf die in allen Versuchen konstante Trägheit der mechanischen Registrierung bezogen werden müssen. Zum anderen ist aber ein tatsächliches Einschießen der Impulse vor einer registrierbaren Kontraktion des Muskels nicht zu leugnen. Wie kann man diese Vorspannung erklären? ELDRED und Mitarbeiter bezogen sie auf das Gamma-System, welches vorauslaufend

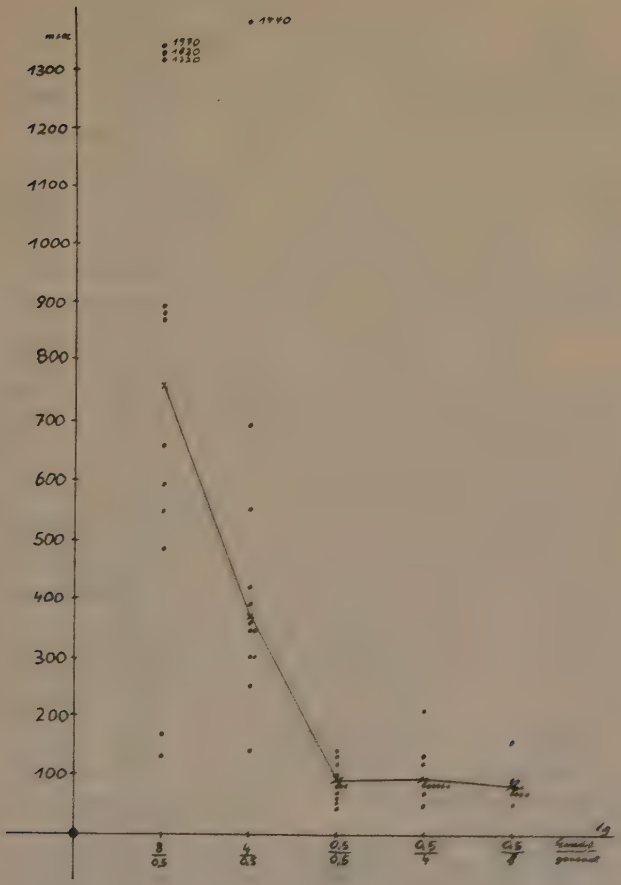


Abb. 9 Zeitraum S 1 - S 2: die vorhandenen Gewichte entsprechen nicht immer den genannten (Täuschungsversuch Serie II)

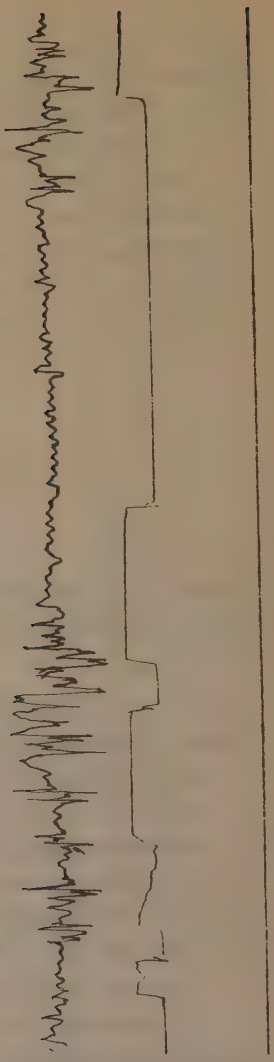

Abb. 10 Versuch Nr. 11
Versuchsperson 3,
Serie II:

Genannt waren 0,5 kg, vorhanden dagegen 8 kg. Beim ersten Ansetzen wird das Gewicht nicht hochgehoben. Erst nach einer Pause von 1500 msec, in der eine zentrale Korrektion vorgenommen wird, kann der Versuch erfolgreich wiederholt werden.

den peripheren Regelkreis in Aktivität setzte. Aus den Überlegungen HUFSCHMIDT's ist zu schließen, daß die Voraktivität einer direkten Aktivierung der Alphamotoneurone entspringt. Vor einer Willkürbewegung sei die Erregungslage des Interneuronenpols durch die polysynaptischen afferenten Impulse aus Muskelspindeln und Golgiorganen bestimmt. Bei Beginn einer Bewegung heben sich bahnende und hemmende Einflüsse auf, so daß der zentrale Impuls vornehmlich die Alphaneurone aktiviere. Welche dieser Vorstellungen zutrifft, ist noch nicht geklärt. Fest steht jedenfalls, daß die im Abschnitt W - S 1 registrierten Potentiale z e n t r a l e n Ursprungs sind.

Wie BAYER und FLECHTENMACHER angegeben haben, darf das Produkt A x f als Maß der Muskelaktivität genommen werden. BERGSTRÖM, CLOSE und Mitarbeiter, ADRIAN u. BRONK und SNYDER bezogen sich demgegenüber nur auf die elektromyographisch registrierte Frequenz der Einheitspotentiale (für Gewichte bis 8 kg, sonst erfolgt eine Amplitudenvergrößerung). Andererseits hat LIPPOLD eine konstante Beziehung zwischen Amplitude und Kraftentfaltung festgestellt. Die gleichzeitige Berücksichtigung von Amplitude und Frequenz bietet wohl die größte Genauigkeit. Wir können also aufgrund dieses Wertes (A x f) eine quantitative Auswertung vornehmen.
Da die Voraktivität in dem Zeitraum W - S 1 genau wie die Aktivität in dem Zeitraum S 1 - S 2 nahezu unter isometrischen Bedingungen ins Spiel gebracht wird, läßt sich auch ein direkter Vergleich beider Zeitabschnitte durchführen. Wir können daraus ablesen, ob die Aktivität dem beabsichtigten Kraftaufwand entspricht. Abb. 3 zeigt, daß das Produkt A x f fast linear ansteigt, wenn den Versuchspersonen nacheinander, mit dem leichtesten beginnend, immer schwerere Gewichte genannt werden. Die elektrische Aktivität nimmt also während

des Zeitabschnittes, der nur durch die Imagination bestimmt ist, parallel zur geforderten Leistung zu. Daß es sich nicht um ein zufälliges Ergebnis handelt, geht aus Abb. 6 hervor: in dem Täuschungsversuch verhält sich die Voraktivität analog dem vorangegangenen Beispiel und bleibt unabhängig von den tatsächlichen Gewichten.

Abgesehen von den zeitlichen Gegebenheiten spricht auch dieses Phänomen deutlich für eine zentrale Programmierung der einzelnen Aktion und gegen eine reflektorische Regelung der Voreinstellung. Diese Annahme wird weiter durch den Wiederholungsversuch gestützt: Abb. 5 zeigt das Verhalten von A x f beim Anheben ungenannter und genannter Gewichte, sowie beim Wiederholungsversuch. Man sieht daraus, daß das Verhältnis zwischen elektrischer Aktivität und Leistung günstiger ist, je genauer der Proband die Aufgabe kennt. Trotz dieser offensichtlichen Verbesserung der Leistung durch Wiederholung und Training - ein Phänomen, welches wir aus dem täglichen Leben kennen - darf man gleichzeitig daraus den Schluß ziehen, daß die verbal angeregte Vorstellung über ein Gewicht (das man allerdings eine gewisse Zeit vorher kennengelernt haben muß) ziemlich exakt den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht.

Ein analoges Verhalten ergibt sich für die Dauer der isometrischen Kontraktion (Abschnitt S 1 - S 2). Sie ist definiert durch den Beginn der Kontaktnahme mit dem Gewicht einerseits und andererseits durch den Zeitpunkt, an dem der Kraftaufwand gerade groß genug wird, um das Gewicht anzuheben. Beim Heben unbekannter Gewichte nimmt S 1 - S 2 proportional der Schwere stark zu (Abb. 8), das Intervall nähert sich indessen mit zunehmender Adaptation an die Aufgabe (Wiederholung) einer individuell unterschiedlichen, im übrigen aber konstanten minimalen Dauer. Dies kann nur

durch eine zunehmend bessere Voreinstellung auf das entsprechende Gewicht erklärt werden (Abb. 4). Wir haben es hier mit einer Korrektur des zentralen Bewegungsentwurfes zu tun, die durch die Erfahrung geleistet wird. Die Erfahrung selbst besteht in der Wahrnehmung der Differenz, wieweit die erste Intention von der optimalen Leistung entfernt geblieben ist. Diese Korrektur entspricht aber nicht einer reflektorischen Regelung während des Bewegungsablaufes. Vielmehr scheint hierfür ein länger dauernder zentraler Prozeß erforderlich zu sein (siehe auch später). Gleichzeitig muß man daraus ableiten, daß die Neigung zur Einstellung auf eine mittlere Ausgangslage, bei der die Möglichkeit zur Korrektur primär einbezogen wird, größer ist, je weniger genau das Gewicht bekannt ist.

Weichen im Täuschungsversuch genanntes Gewicht, also dasjenige, auf das sich der Proband einstellt, und tatsächliches Gewicht voneinander ab (Serie II), so ist zu beobachten, daß das Programm, das der Intention des Probanden entspricht, bei exakter Einstellung praktisch unverändert durchgeführt wird. So resultiert bei optimaler Mitarbeit der Versuchsperson, daß ein Gewicht von 8 kg, welches als geringer angegeben wird, beispielsweise nicht hochgebracht werden kann. Der Bewegungsablauf muß ganz neu begonnen werden (Abb. 10). Daraus dürfen wir schließen, daß auch die Aktivität in der Zeit S 1 - S 2 zentral gesteuert wird. Falls eine reflektorische Regelung eingreift, bleibt diese doch untergeordnet. Wir haben es hier mit einem Phänomen zu tun, welches auch gut im Einklang steht mit anderen experimentellen Befunden. So fand HUFSCHMIDT (1962) eine monosynaptische Hemmung während der Aktivitätsphase eines Muskels. Aus einer jüngsten Publikation dieses Autors (1965) geht hervor, daß polysynaptische Reflexe während einer Willkürbewegung blockiert werden. Ein weiterer Hinweis ergibt sich aus der Tatsache, daß der

raschen Willkürbewegung eine deutliche Hemmungsphase in Agonist und Antagonist vorausläuft (HUFSCHMIDT und HUFSCHMIDT 1954; HOPF und HUFSCHMIDT 1963).
Diese vorauslaufende Hemmung hat offenbar die Aufgabe, Ausgangsbedingungen zu schaffen, unter denen die zentralen Impulse sich am günstigsten und ungestörtesten auswirken können. Die Hemmungsphase während einer raschen Willkürbewegung soll wohl störenden Einflüssen aus der Peripherie soweit wie möglich eliminieren. Das aber bedeutet, daß gerade der periphere Regelkreis ausgeschaltet wird. Bemerkenswert erscheint in diesem Zusammenhang, daß die Prävalenz der zentralen Steuerung gegenüber dem propriozeptiven Einfluß zurücktritt, wenn das Gegenteil einer raschen Willkürbewegung, nämlich eine langsam ausbalancierende Aktion beabsichtigt ist (HANDWERKER, persönliche Mitteilung).

Neben diesem prinzipiellen Verhalten kann natürlich nicht übersehen werden, daß große Variationen schon bei der gleichen Versuchsperson vorkommen. Dies liegt einmal sicherlich daran, daß bei der Willküraktion, wie WACHHOLDER schon betont hat, niemals von einer schematischen Ausführung gesprochen werden kann: "denn nicht das Schema, sondern die Wandlungsfähigkeit ist die Norm". PAILLARD (1960) hat hervorgehoben, daß eine Versuchsperson "eine gegebene Bewegung niemals identisch reproduzieren kann". Ausgenommen sind davon lediglich extrem trainierte Bewegungen, z.B. die Griffe eines Violinvirtuosen. Entsprechende Schwankungen der Werte bei zwei an sich gleichen Versuchen (z.B. Serie I Versuch Nr. 12 und Serie II Versuch Nr. 6, Tab. IV) konnten auch wir feststellen. Außerdem bestehen große individuelle Abweichungen. Die Mittelwerte zeigen also vor allem Tendenzen an, diese jedoch evident. Indessen können sie nicht als absolute Werte gelten.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen sollten zeigen, ob und wieweit eine zentrale Programmierung einer Einzelaktion des M. biceps brachii nachzuweisen ist.

Als Zeichen einer zentralen Programmierung werden die folgenden Ergebnisse gedeutet:

1. Die Dauer der Voraktivität ist, elektromyographisch gemessen, ziemlich konstant.
2. Die elektrische Muskelaktivität während der Vorspannung entspricht der geforderten Leistung.
3. Die Geschwindigkeit, mit der die Phase der isometrischen Kontraktion durchlaufen wird, richtet sich nach der Angemessenheit der Voreinstellung. Durch Änderung der effektiven Leistung wird der Aktivitätsablauf nicht oder nur unwesentlich beeinflußt.

Diese Feststellungen gelten jedoch nur für die rasche Willkürkontraktion. Für diese Bewegungsart kommt offenbar vorwiegend der zentrale Bewegungsentwurf zum Tragen, während peripher regulierende Einflüsse (Propriozeptivität) gering sind, oder ganz fehlen.

Tab. I

Vorspannung: Dauer in m sec

| Versuchsperson | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gew. - genannt (kg) | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | -- | -- | 130 | 273 | 207 | 286 | 220 | 376 | 312 | 221 | 260 | 137 | 247 |
| 0,5 | Wh | 285 | 130 | 390 | 195 | -- | 207 | 247 | 221 | 260 | 260 | 305 | 285 |
| 0,5 | 0,5 | 350 | 143 | 286 | 117 | 195 | 312 | 260 | 195 | 300 | 184 | 147 | 312 |
| 0,5 | 8 | 233 | 172 | 273 | 110 | 208 | 182 | 195 | 101 | 195 | 430 | 105 | 195 |
| 0,5 | 4 | 350 | 110 | 286 | 169 | 286 | 221 | 235 | 130 | 273 | 365 | 169 | 221 |
| 0,5 | 0,5 | 390 | -- | 286 | 156 | 260 | 207 | 195 | 169 | 260 | 169 | 169 | 273 |
| 1 | -- | 350 | 273 | 455 | 182 | 273 | 195 | 286 | 234 | 246 | 234 | 232 | 273 |
| 1 | Wh | 300 | 234 | 217 | 130 | -- | -- | 286 | 207 | 286 | 246 | 200 | 350 |
| 1 | 1 | 337 | -- | 376 | 207 | -- | 234 | 260 | 300 | 286 | 207 | 148 | 350 |
| 2 | -- | 246 | 207 | 325 | 156 | 234 | 169 | 350 | 143 | 222 | 207 | 190 | 390 |
| 2 | Wh | 221 | 156 | 312 | 169 | 350 | 169 | 312 | 221 | 246 | 221 | 221 | 312 |
| 2 | 2 | 427 | 195 | 350 | 130 | 300 | 182 | 300 | 221 | 207 | 169 | 126 | 286 |
| 4 | -- | 286 | 143 | 430 | 130 | 235 | 273 | 260 | 208 | 312 | 221 | 126 | 246 |
| 4 | Wh | 300 | 156 | 402 | 207 | 312 | 207 | 221 | 169 | 338 | 260 | 147 | 273 |
| 4 | 4 | 221 | 246 | 337 | 182 | -- | 234 | 134 | 221 | 208 | 208 | 168 | 286 |
| 4 | 0,5 | 390 | 156 | 286 | 221 | 286 | 325 | 246 | 169 | 221 | 246 | 200 | 273 |
| 4 | 4 | 350 | -- | 286 | 364 | 286 | 169 | 286 | 182 | 221 | 208 | 168 | 286 |
| 8 | -- | 443 | 195 | 338 | 195 | 350 | 208 | 234 | 182 | 260 | 300 | 211 | 260 |
| 8 | Wh | 415 | 182 | 325 | 221 | 221 | 246 | 337 | 143 | 182 | 234 | 211 | 234 |
| 8 | 8 | 390 | 169 | 439 | 143 | 403 | 234 | 246 | 234 | 274 | 234 | 189 | 260 |
| 8 | 0,5 | 364 | 377 | 404 | 182 | 300 | 337 | 390 | 208 | 221 | 195 | 168 | 325 |
| 8 | 8 | 350 | 234 | 364 | 234 | 325 | 246 | 182 | 208 | 182 | 182 | 169 | 221 |

Tab. II a

Impulse in der Vorspannungszeit

| Versuchsperson | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gew. - genannt (kg) | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | -- | -- | 7 | 15 | 10 | 12 | 14 | 15 | 19 | 8 | 13 | 7 | 17 |
| 0,5 | Wh | 8 | 6 | 18 | 7 | -- | 14 | 13 | 16 | 10 | 15 | 13 | 19 |
| 0,5 | 0,5 | 20 | 7 | 17 | 5 | 9 | 14 | 11 | 14 | 8 | 12 | 8 | 21 |
| 0,5 | 8 | 8 | 10 | 16 | 6 | 12 | 7 | 11 | 8 | 8 | 24 | 9 | 15 |
| 0,5 | 4 | 9 | 8 | 13 | 8 | 13 | 13 | 13 | 10 | 14 | 22 | 11 | 15 |
| 0,5 | 0,5 | 14 | -- | 11 | 9 | 11 | 11 | 12 | 11 | 11 | 10 | 11 | 18 |
| 1 | -- | 11 | 14 | 24 | 11 | 13 | 10 | 13 | 9 | 12 | 11 | 9 | 18 |
| 1 | Wh | 13 | 10 | 10 | 8 | 17 | 18 | 11 | 12 | 12 | 16 | 10 | 21 |
| 1 | 1 | 16 | -- | 15 | 11 | -- | 12 | 12 | 21 | 14 | 12 | 9 | 24 |
| 2 | -- | 11 | 9 | 19 | 10 | 11 | 7 | 15 | 8 | 9 | 13 | 10 | 19 |
| 2 | Wh | 9 | 10 | 13 | 6 | 12 | 10 | 13 | 14 | 9 | 12 | 6 | 20 |
| 2 | 2 | 17 | 10 | 18 | 4 | 15 | 5 | 11 | 14 | 12 | 11 | 8 | 18 |
| 4 | -- | 11 | 6 | 18 | 7 | 12 | 11 | 12 | 12 | 16 | 12 | 11 | 14 |
| 4 | Wh | 11 | 8 | 17 | 7 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 14 | 7 | 16 |
| 4 | 4 | 10 | 10 | 17 | 8 | -- | 10 | 10 | 12 | 9 | 13 | 9 | 17 |
| 4 | 0,5 | 16 | 7 | 10 | 12 | 9 | 14 | 12 | 10 | 10 | 13 | 9 | 17 |
| 4 | 4 | 14 | -- | 10 | 17 | 12 | 10 | 11 | 10 | 11 | 11 | 8 | 15 |
| 8 | -- | 16 | 7 | 18 | 12 | 17 | 9 | 9 | 10 | 13 | 14 | 10 | 14 |
| 8 | Wh | 19 | 10 | 23 | 12 | 15 | 15 | 17 | 11 | 13 | 16 | 15 | 17 |
| 8 | 8 | 18 | 7 | 23 | 8 | 13 | 12 | 15 | 13 | 8 | 13 | 12 | 16 |
| 8 | 0,5 | 14 | 14 | 19 | 9 | 14 | 11 | 12 | 12 | 6 | 10 | 7 | 17 |
| 8 | 8 | 15 | 11 | 22 | 8 | 16 | 13 | 9 | 14 | 9 | 10 | 10 | 14 |

Tab. II b

Vorspannung: mittlere Frequenz

| Versuchsperson | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gew. - genannt (kg) | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | -- | -- | 54 | 55 | 48 | 42 | 64 | 40 | 61 | 36 | 50 | 51 | 69 |
| 0,5 | Wh | 28 | 46 | 46 | 36 | -- | 67 | 53 | 61 | 38 | 57 | 43 | 67 |
| 0,5 | 0,5 | 57 | 49 | 59 | 43 | 46 | 45 | 42 | 71 | 27 | 65 | 54 | 67 |
| 0,5 | 8 | 34 | 58 | 58 | 34 | 58 | 39 | 56 | 80 | 41 | 56 | 85 | 77 |
| 0,5 | 4 | 26 | 72 | 45 | 47 | 45 | 58 | 53 | 76 | 51 | 60 | 65 | 68 |
| 0,5 | 0,5 | 36 | -- | 38 | 58 | 42 | 53 | 61 | 65 | 42 | 69 | 65 | 65 |
| 1 | -- | 31 | 51 | 53 | 60 | 47 | 51 | 45 | 49 | 48 | 47 | 39 | 66 |
| 1 | Wh | 44 | 43 | 46 | 61 | 37 | 32 | 38 | 58 | 42 | 65 | 50 | 60 |
| 1 | 1 | 47 | -- | 40 | 53 | -- | 51 | 46 | 70 | 45 | 48 | 61 | 65 |
| 2 | -- | 44 | 43 | 58 | 64 | 47 | 42 | 43 | 56 | 40 | 63 | 53 | 49 |
| 2 | Wh | 41 | 64 | 42 | 36 | 34 | 60 | 42 | 63 | 32 | 54 | -- | 64 |
| 2 | 2 | 42 | 51 | 51 | 31 | 50 | 27 | 36 | 63 | 58 | 65 | 63 | 63 |
| 4 | -- | 38 | 41 | 42 | 54 | 51 | 40 | 46 | 57 | 51 | 54 | -- | 57 |
| 4 | Wh | 37 | 70 | 42 | 34 | 35 | 53 | 50 | 53 | 33 | 54 | 47 | 56 |
| 4 | 4 | 45 | 40 | 50 | 44 | -- | 43 | 43 | 54 | 43 | 62 | 53 | 59 |
| 4 | 0,5 | 41 | 42 | 35 | 54 | 32 | 43 | 49 | 63 | 45 | 52 | 45 | 62 |
| 4 | 4 | 40 | -- | 35 | 47 | 42 | 62 | 39 | 55 | 49 | 52 | 47 | 52 |
| 8 | -- | 36 | 36 | 53 | 61 | 48 | 43 | 37 | 55 | 50 | 47 | 47 | 53 |
| 8 | Wh | 46 | 55 | 30 | 54 | 67 | 61 | 50 | 71 | 71 | 68 | 71 | 72 |
| 8 | 8 | 46 | 42 | 52 | 56 | 32 | 51 | 60 | 56 | 28 | 55 | 63 | 61 |
| 8 | 0,5 | 38 | 37 | 47 | 49 | 47 | 33 | 31 | 57 | 27 | 51 | 42 | 52 |
| 8 | 8 | 43 | 47 | 60 | 34 | 49 | 53 | 49 | 67 | 49 | 55 | 59 | 63 |

Tab. II c

Vorspannung: mittlere Amplitude (mm)

| Versuchsperson | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gew. - genannt (kg) | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | -- | -- | 2 | 3 | 2 | 3 | 8 | 7 | 6 | 4 | 10 | 2 | 5 |
| 0,5 | Wh | 2 | 2 | 3 | 2 | -- | 7 | 5 | 6 | 4 | 8 | 3 | 5 |
| 0,5 | 0,5 | 3 | 2 | 3 | 2 | 8 | 5 | 5 | 9 | 4 | 8 | 8 | 4 |
| 0,5 | 8 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 8 | 10 | 8 | 10 | 13 | 7 | 6 |
| 0,5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 8 | 7 | 10 | 10 | 6 |
| 0,5 | 0,5 | 3 | -- | 3 | 5 | 4 | 7 | 9 | 9 | 5 | 9 | 5 | 8 |
| 1 | -- | 3 | 2 | 3 | 4 | 7 | 10 | 6 | 5 | 5 | 10 | 4 | 5 |
| 1 | Wh | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 5 | 4 | 8 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 5 | -- | 3 | 4 | -- | 8 | 5 | 6 | 4 | 10 | 8 | 6 |
| 2 | -- | 5 | 2 | 3 | 6 | 8 | 8 | 5 | 10 | 8 | 10 | 6 | 6 |
| 2 | Wh | 5 | 3 | 3 | -- | 8 | 8 | 4 | 8 | 2 | 10 | 3 | 6 |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 5 | 6 | 5 | 8 | 6 | 10 | 12 | 6 |
| 4 | -- | 4 | 4 | 3 | 3 | 6 | 6 | 7 | 6 | 8 | 11 | 11 | 7 |
| 4 | Wh | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 8 | 9 | 5 | 11 | 7 | 5 |
| 4 | 4 | 7 | 3 | 6 | 3 | -- | 8 | 11 | 6 | 5 | 11 | 10 | 8 |
| 4 | 0,5 | 4 | 2 | 3 | 5 | 3 | 6 | 6 | 8 | 6 | 10 | 4 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | -- | 2 | 5 | 4 | 11 | 6 | 8 | 8 | 12 | 8 | 6 |
| 8 | -- | 7 | 3 | 4 | 7 | 4 | 6 | 7 | 8 | 7 | 12 | 9 | 7 |
| 8 | Wh | 4 | 3 | 7 | 12 | 9 | 8 | 6 | 14 | 10 | 14 | 8 | 8 |
| 8 | 8 | 8 | 6 | 7 | 8 | 6 | 12 | 10 | 7 | 10 | 12 | 7 | 7 |
| 8 | 0,5 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 10 | 5 | 8 | 5 | 6 |
| 8 | 8 | 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 6 | 13 | 8 | 10 | 12 | 8 | 8 |

Tab. II d

Vorspannung: Frequenz x Amplitude = Energie

| Versuchsperson | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gew. - genannt (kg) | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | -- | -- | 108 | 165 | 96 | 126 | 512 | 280 | 366 | 144 | 500 | 102 | 345 |
| 0,5 | Wh | 56 | 92 | 138 | 72 | -- | 469 | 265 | 366 | 152 | 456 | 129 | 335 |
| 0,5 | 0,5 | 171 | 98 | 177 | 86 | 368 | 225 | 210 | 639 | 108 | 520 | 432 | 268 |
| 0,5 | 8 | 138 | 174 | 290 | 216 | 232 | 312 | 560 | 640 | 410 | 730 | 590 | 460 |
| 0,5 | 4 | 78 | 216 | 180 | 235 | 135 | 348 | 275 | 610 | 357 | 600 | 650 | 408 |
| 0,5 | 0,5 | 108 | -- | 114 | 290 | 168 | 371 | 550 | 580 | 210 | 530 | 325 | 520 |
| 1 | -- | 93 | 102 | 159 | 240 | 324 | 510 | 270 | 195 | 240 | 470 | 156 | 330 |
| 1 | Wh | 132 | 86 | 138 | 244 | 148 | 128 | 76 | 290 | 168 | 520 | 150 | 240 |
| 1 | 1 | 235 | -- | 120 | 212 | -- | 408 | 230 | 420 | 180 | 480 | 488 | 390 |
| 2 | -- | 220 | 86 | 174 | 384 | 376 | 336 | 215 | 560 | 320 | 630 | 318 | 294 |
| 2 | Wh | 205 | 192 | 126 | -- | 272 | 48 | 294 | 504 | 64 | 540 | -- | 384 |
| 2 | 2 | 126 | 102 | 153 | 62 | 250 | 162 | 180 | 504 | 348 | 650 | 756 | 378 |
| 4 | -- | 152 | 164 | 126 | 162 | 306 | 240 | 322 | 342 | 408 | 394 | -- | 400 |
| 4 | Wh | 111 | 210 | 126 | 102 | 105 | 424 | 400 | 473 | 165 | 594 | 339 | 392 |
| 4 | 4 | 315 | 120 | 300 | 132 | -- | 344 | 473 | 324 | 215 | 682 | 530 | 472 |
| 4 | 0,5 | 164 | 84 | 105 | 270 | 96 | 258 | 294 | 504 | 270 | 520 | 180 | 496 |
| 4 | 4 | 160 | -- | 70 | 235 | 168 | 682 | 234 | 440 | 392 | 624 | 376 | 312 |
| 8 | -- | 252 | 108 | 212 | 427 | 192 | 258 | 259 | 440 | 350 | 564 | 423 | 371 |
| 8 | Wh | 144 | 165 | 490 | 648 | 603 | 488 | 300 | 990 | 710 | 950 | 568 | 576 |
| 8 | 8 | 368 | 252 | 364 | 448 | 192 | 612 | 600 | 392 | 280 | 660 | 441 | 427 |
| 8 | 0,5 | 114 | 74 | 141 | 196 | 188 | 132 | 62 | 570 | 135 | 408 | 210 | 312 |
| 8 | 8 | 129 | 148 | 300 | 102 | 147 | 318 | 637 | 537 | 480 | 660 | 741 | 504 |

Tab. III

Zeit zwischen Anheben ohne Gewicht (S 1) Anheben mit Gewicht (S 2) in msec

| Versuchsperson | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gew. - genannt (kg) | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | -- | 78 | 169 | 92 | 224 | 300 | 78 | 78 | 92 | 130 | 52 | 117 | 78 |
| 0,5 | Wh | 92 | 78 | 117 | 92 | 338 | 92 | 105 | 78 | 208 | 52 | 126 | 92 |
| 0,5 | 0,5 | 65 | 92 | 78 | 92 | 92 | 92 | 105 | 92 | 143 | 52 | 64 | 78 |
| 0,5 | 8 | 92 | 78 | 78 | 52 | 92 | -- | 65 | 65 | 78 | -- | -- | 65 |
| 0,5 | 4 | 78 | 117 | 130 | 78 | 91 | -- | 78 | 78 | 78 | -- | -- | 65 |
| 0,5 | 0,5 | 91 | 143 | 130 | 65 | 78 | -- | 78 | 78 | 117 | -- | 52 | 78 |
| 1 | -- | 130 | 104 | 156 | 104 | 117 | 91 | 104 | 130 | 117 | 39 | 74 | 78 |
| 1 | Wh | 221 | 234 | 130 | 78 | 224 | 130 | 156 | 104 | 169 | 39 | 127 | 143 |
| 1 | 1 | 104 | 286 | 92 | 117 | 429 | 117 | 117 | 234 | 156 | 78 | 63 | 91 |
| 2 | -- | 104 | 247 | 156 | 156 | 117 | 130 | 195 | 78 | 182 | 65 | 186 | 169 |
| 2 | Wh | 143 | 143 | 169 | 208 | 286 | 130 | 195 | 169 | 455 | 65 | 305 | 221 |
| 2 | 2 | 246 | 130 | 260 | 247 | 234 | 182 | 312 | 143 | 234 | 91 | 74 | 182 |
| 4 | -- | 364 | 156 | 507 | 403 | 273 | 234 | 247 | 195 | 390 | 104 | 104 | 286 |
| 4 | Wh | 403 | 234 | 338 | 299 | 364 | 208 | 208 | 130 | 455 | 91 | 158 | 221 |
| 4 | 4 | 221 | 246 | 416 | 572 | 793 | 299 | 286 | 182 | 507 | 91 | 126 | 208 |
| 4 | 0,5 | 299 | 338 | 546 | 390 | 416 | -- | 247 | 689 | 351 | -- | -- | 364 |
| 4 | 4 | 299 | 338 | 624 | 416 | 416 | 221 | 312 | 312 | 442 | 91 | 126 | 234 |
| 8 | -- | 274 | 507 | 674 | 507 | 949 | 637 | 481 | 806 | 585 | 286 | 306 | 338 |
| 8 | Wh | 507 | 325 | 234 | 299 | 429 | 260 | 494 | 169 | 299 | 117 | 222 | 338 |
| 8 | 8 | 299 | 390 | 364 | 559 | 598 | 403 | 338 | 793 | 445 | 169 | 126 | 403 |
| 8 | 0,5 | 481 | 8 | 870 | 897 | 585 | -- | 884 | 1830 | 1320 | -- | -- | 663 |
| 8 | 8 | 468 | 349 | 468 | 819 | 1350 | 390 | 351 | 247 | 351 | 117 | 611 | 364 |

Tab. IV

| Versuchsperson | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vers. I/12 | 65 | 92 | 78 | 92 | 92 | 92 | 105 | 92 | 143 | 52 | 64 | 78 |
| II/ 6 | 91 | 143 | 130 | 65 | 78 | 104 | 78 | 78 | 117 | 39 | 52 | 78 |

Tabelle : Zeit S 1 - S 2 der Versuche 12, Serie I, und 6, Serie II, (vorhanden 0,5 kg, genannt 0,5 kg).

Herrn Prof. Dr. Schaltenbrand danke ich für die Übernahme des Korreferates und für die Möglichkeit, die Einrichtungen seiner Klinik, insbesondere das Myographische Labor zu benützen.

Herrn Prof. Dr. med. P. Polzien danke ich für die Überlassung des Dissertationsthemas und, wie auch ganz besonders Herrn Priv. Doz. Dr. med. H.C. Hopf, für die weitgehende Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Versuche.

## LITERATURVERZEICHNIS


1) Adrian u. Moruzzi: J. Physiol. London, 97, 153 (1939)

2) Bayer, H., Flechtenmacher, G.: Ermüdung und Aktionsstromspannung bei der isometrischen Muskelkontraktion des Menschen
Arbeitsphysiologie , 14, 261-270 (1950)

3) Bergström, R.M.: Elektrische Aktivität und mechanischer Kraftimpuls des quergestreiften Muskels bei voluntärer isometrischer Kontraktion
Ann. Acad.Sci.Fenn., V - A, 71

4) Bergström, R.M.: Relation between Numbers of Impulses and the Integrated Electric Activity in the Electromyogram
Acta physiol.Scand., 45, 97 - 101

5) Close, J.R., Nickel, E.D. and Todd : F.H. Oakland/California: Motor-unit action - potential counts. Their significance in isometric and isotonic contractions
J.Bone Jt. Surg., 42 - A, 1207-1222 (1960)

6) Cornely, K.: Über die Propriozeptivität der kleinen Handmuskeln; Inaugural - Dissertation, Würzburg, 1964

7) Eldred, E.R., Granit and P.A. Merton: Supraspinal Control of the Muscle-Spindles and its Significance
J. Physiol. (Lond.), 122, 498 - 523

8) Gellhorn, E.: Autonomic regulations, their significance for physiology, psychology and neuro-psychiatry
Interscience Publishers, New York, 1943

9) Herterich, E.: Beitrag zur Koordination der Stammmuskulatur - Inaugural-Dissertation, Würzburg, 1962

10) Hopf, H.A. und Hufschmidt, H.J.: Die Koordination benachbarter Muskeln bei einfachen Willkürbewegungen
Dtsch.Ztschr. f. Nervenheilkunde 185, 191 - 202 (1963)

11) Hufschmidt, H.J.: Die rasche Willkürkontraktion
Ztschr.f.Biol. 107, 1 - 24 (1952)

12) Hufschmidt, H.J.: Die Innervation der Rückenmuskulatur des Menschen
Pflügers Archiv 269, 1 - 9 (1959)

13) Hufschmidt, H.J.: Über die Willkürkontraktion des Parkinsonisten
Dtsch.Ztschr.f.Nervenheilkunde 181, 37 - 45 (1960)

14) Hufschmidt, H.J.: Über einen supraspinalen Hemmungsmechanismus
Pflügers Archiv 275, 463 - 741 (1962)

15) Hufschmidt, H.J.: Bausteine motorischer Regelung
Schw.Arch.Neurol., Neurochir., Psychiatrie 87, 260 - 280 (1961)

16) Hufschmidt, H.J.: und Hufschmidt, T. Antagonist inhibition as the earliest sign of sensory motor reaction
Nature, London, 174, 607 (1954)

17) Hufschmidt, H.J. und Hufschmidt, T: Cortical integration of movement
Human Physiology, 82, 1035 - 1048

18) Hufschmidt, H.J.: Zur funktionellen Organisation der motorischen Einheiten eines Muskels
Dtsch.Ztschr.f.Nervenheilkunde 178, 583 - 613 (1959)

19) Knowlton, Hines, Keever and Bennet: Relation between electromyographic voltage and load
Appl. Physiol., 9, 473-476 (1956)

20) Lashley, K.S.: In search of the engram
Symposion of the Society for experimental Biology 4, 454-482 (1950)

21) Leibbrand, W. u.A.: Kompendium der Medizingeschichte
München 1963

22) Lippold, O.C.J.: The relation betweenintegrated action - potentials in human muscle and its tension
J. Physiol.,117, 492 - 499 (1952)

23) Paillard, J.: The Patterning of the skilled Movements
Chapter LXVII in: Handbook of Physiologie, Section 1: Neurophysiologie, Vol. III, Ed.by John Field
Washington D.C.: American Physiological Society 1960

24) Rein-Schneider: Lehrbuch der Physiologie, Springer
Berlin 1960

25) Snyder, R.A. and Burton: Observations of the Nature of the Graduation of voluntary Muscle Contraction
Ph. D. Thesis, Univ. of Western Ontaria, London, Ontario, 1953

26) Wacholder, K. : Willkürliche Haltung und Bewegung insbesondere im Lichte elektrophysiologischer Untersuchungen
Bergmann, München 1928

## LEBENSLAUF

Am 18. Januar 1941 wurde ich als Sohn der Eheleute Hans und Sophie Hausmanns, geb. Tillmanns in Dülken geboren. Nach einem Besuch des Progymnasiums Dülken und des Mathematisch - Naturwissenschaftlichen Gymnasiums Mönchen - Gladbach bestand ich dort im März 1960 das Abitur. Dann studierte ich fünf Semester an der Universität Würzburg; nach je einem Semester in Köln und Wien kehrte ich nach Würzburg zurück, wo ich im Januar 1966 die ärztliche Prüfung erfolgreich ablegte.

Anschließend leistete ich fünf Monate meiner Medizinal - assistentenzeit auf der chirurgischen Abteilung des Kreis-krankenhauses Ochsenfurt ab, wo ich z.Zt. auf der inneren Abteilung beschäftigt bin.

Ich versichere ehrenwörtlich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und außer der angegebenen Literatur keine weiteren Hilfsquellen benutzt habe.
Ich versichere ehrenwörtlich, daß ich bisher von keiner anderen Seite ein Dissertationsthema zur endgültigen Bearbeitung erhalten habe.

Jürgen Hausmanns

**BÖHLER-DRUCK**

87 WÜRZBURG, Wirsbergstr. 10
Tel. 54143

**BÖHLER-DRUCK**

87 WÜRZBURG, Wirsbergstr. 10
Tel. 5 41 43